



Implementasi UAV dan ArcGIS untuk Pemetaan 3D Kawasan Hutan Konservasi Ubadari

Nelson Rumui¹, Deisy Maulida Al Hamid², Syukron Anas³
^{1,2,3}Jurusan Manajemen Informatika, Politeknik Negeri Fakfak
¹nelson@polinef.ac.id, ²deisy@polinef.ac.id, ³syukron@polinef.ac.id

Abstract

This study aims to produce a three-dimensional (3D) visualisation model of the Ubadari Conservation Forest Area in Fakfak Regency, West Papua, using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology and ArcGIS Pro software. Aerial imagery data was collected through photogrammetric missions with calibrated parameters. This elevation model has high accuracy with a Root Mean Square Error (RMSE) value of 0.35 metres, indicating an average vertical deviation of only about 35 cm from the actual elevation value—accurate enough for conservation and advanced mapping applications. Spatial analysis was conducted to map topography, vegetation index (NDVI), land cover classification using the k-means clustering algorithm, as well as zones prone to degradation and potential fires. The results show that more than 15% of the area has a slope of >30%, and around 22.3% of the area is classified as having poor vegetation health. Meanwhile, 23.7% of the area was classified as low vegetation cover. Degradation and fire-prone zones covered 18.5% of the study area, mainly around road access and the edges of the area. These findings contribute to data-based monitoring systems and form an important basis for risk mitigation planning and conservation forest ecosystem preservation.

Keywords: UAV, photogrammetry, ArcGIS Pro, NDVI, land cover classification, fire-prone zones, conservation forests, Fakfak

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model visualisasi tiga dimensi (3D) Kawasan Hutan Konservasi Ubadari di Kabupaten Fakfak, Papua Barat, dengan menggunakan teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) dan perangkat lunak ArcGIS Pro. Data citra udara dikumpulkan melalui misi fotogrametri dengan parameter terkalibrasi. Model elevasi ini memiliki akurasi tinggi dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,35 meter, yang menunjukkan deviasi rata-rata vertikal hanya sekitar 35 cm dari nilai elevasi sebenarnya—cukup akurat untuk aplikasi konservasi dan pemetaan lanjutan. Analisis spasial dilakukan untuk memetakan topografi, indeks vegetasi (NDVI), klasifikasi tutupan lahan menggunakan algoritma *k-means clustering*, serta zona rawan degradasi dan potensi kebakaran. Hasil menunjukkan bahwa lebih dari 15% wilayah memiliki kemiringan >30%, dan sekitar 22,3% area tergolong dalam kondisi vegetasi kurang sehat. Sementara itu, 23,7% wilayah diklasifikasikan sebagai tutupan vegetasi rendah. Zona rawan degradasi dan kebakaran mencakup 18,5% wilayah studi, terutama di sekitar akses jalan dan tepi kawasan. Temuan ini berkontribusi terhadap sistem monitoring berbasis data dan menjadi dasar penting dalam perencanaan mitigasi risiko dan pelestarian ekosistem hutan konservasi.

Kata kunci: UAV, fotogrametri, ArcGIS Pro, NDVI, klasifikasi tutupan lahan, zona rawan kebakaran, hutan konservasi, Fakfak

1. Pendahuluan

Kawasan hutan konservasi merupakan ekosistem yang dilindungi untuk menjaga keberlanjutan fungsi ekologis, keanekaragaman hayati, dan cadangan karbon bumi [1]. Sebagai ekosistem yang kaya akan sumber daya alam dan biodiversitas, kawasan hutan konservasi juga menjadi benteng penting dalam menghadapi degradasi lingkungan yang semakin intensif akibat aktivitas manusia. Di Indonesia, kawasan ini menjadi bagian integral dari upaya mitigasi perubahan iklim dan pelestarian flora-fauna endemik. Salah satu kawasan

konservasi yang memiliki peran vital tersebut adalah Hutan Ubadari di Kabupaten Fakfak, Papua Barat. Hutan ini dikelola secara kolaboratif oleh masyarakat lokal, Pemerintah Kabupaten Fakfak, dan didukung oleh Yayasan Konservasi Indonesia (YKI), yang berkomitmen untuk mendorong pembangunan berkelanjutan dan pelestarian lingkungan hidup di Indonesia.

Kabupaten Fakfak di Papua barat memiliki kawasan hutan konservasi yang kaya akan keanekaragaman hayati, termasuk herpetofauna, burung endemik, dan spesies ekologis penting lainnya, sehingga berperan



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

sebagai koridor ekologis bagi spesies endemik [2], salah satunya adalah kawasan konservasi hutan Ubadari. Keberadaan hutan ini juga berperan penting dalam menjaga siklus hidrologi dan keseimbangan iklim mikro di wilayah Fakfak. Selain sebagai kawasan ekologis strategis, hutan Ubadari memiliki nilai sosial dan budaya yang tinggi, di mana masyarakat adat setempat menggantungkan hidupnya pada sumber daya alam yang tersedia secara lestari. Praktik kearifan lokal yang telah diwariskan turun-temurun, seperti sistem sasi dan pengelolaan berbasis zonasi adat, menjadi salah satu kekuatan utama dalam mendukung upaya pelestarian kawasan ini.

Namun, modernisasi yang tidak terkelola dengan baik, masuknya aktivitas ekonomi yang bersifat ekstraktif, serta minimnya data spasial yang mendukung pengambilan kebijakan menjadi tantangan serius dalam pengelolaan kawasan ini. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi UAV diharapkan mampu menjadi jembatan antara kearifan lokal dan penerapan teknologi modern dalam menjaga kelestarian hutan Ubadari.

Pemetaan 3D menggunakan UAV telah menjadi metode inovatif dalam memperoleh data spasial dengan resolusi tinggi. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan informasi secara cepat, efisien, dan dengan cakupan area yang luas dan menghasilkan data beresolusi tinggi [3] [4], [5]. Perkembangan UAV yang terintegrasi dengan sensor multispektral, LiDAR, serta kecerdasan buatan (AI) semakin memperkuat kemampuannya dalam mendukung konservasi hutan secara presisi [6]. Teknologi ini juga sangat relevan untuk wilayah terpencil dan akses sulit seperti kawasan Fakfak, yang memiliki topografi curam dan vegetasi rapat [7].

Berbagai studi menunjukkan bahwa pemanfaatan UAV untuk pemantauan kondisi hutan mampu meningkatkan efektivitas dalam mendeteksi perubahan tutupan lahan, mengidentifikasi area rawan degradasi, dan memantau kesehatan vegetasi secara real-time [5], [8]. ArcGIS Pro sebagai perangkat lunak pemetaan dan analisis spasial memungkinkan integrasi data dari UAV untuk menghasilkan model 3D, analisis indeks vegetasi menggunakan NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), serta klasifikasi tutupan lahan dengan metode *unsupervised* seperti *k-means clustering*. Penggunaan NDVI berbasis data UAV menjadi salah satu indikator utama untuk mendeteksi *stress* pada lingkungan dan degradasi lahan [9]. Selain itu, penerapan algoritma machine learning seperti *k-means clustering* terbukti efektif dalam klasifikasi tutupan lahan. Kombinasi UAV dan GIS juga dapat membantu dalam mengidentifikasi zona rawan kebakaran hutan, ancaman serius terhadap keberlanjutan kawasan konservasi [10], [11].

Kemajuan teknologi ini juga memungkinkan penerapan Convolutional Neural Networks (CNN) untuk

klasifikasi spesies pohon dan estimasi biomassa hutan yang lebih akurat [12]. Integrasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) menjadi strategi penting dalam deteksi dini potensi kebakaran hutan, sebagaimana diuraikan oleh Sharma et al. [9] dan Hasan et al. [5].

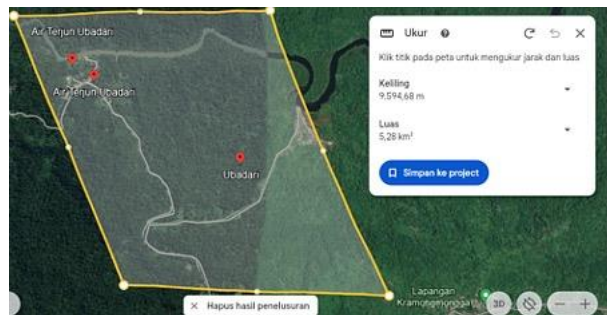
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: Menghasilkan model visualisasi 3D kawasan Hutan Konservasi Ubadari; Menganalisis topografi dan kemiringan wilayah; Mengkaji kondisi vegetasi melalui NDVI dan klasifikasi tutupan lahan; Mengidentifikasi zona rawan degradasi dan potensi kebakaran berbasis analisis spasial.

Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan sistem monitoring berbasis teknologi yang dapat mendukung pengambilan keputusan strategis dalam pengelolaan kawasan hutan konservasi.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kawasan Hutan Konservasi Ubadari yang terletak di Kabupaten Fakfak, dapat dilihat pada Gambar 1, Papua Barat, dengan luas $\pm 5,28$ km². Kawasan ini dipilih karena memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang tinggi dan menghadapi tekanan lingkungan yang signifikan akibat aktivitas perambahan dan perubahan penggunaan lahan.



Gambar 1. Lokasi Area Penelitian di Kawasan Hutan Konservasi Ubadari

2.3 Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksploratif-deskriptif dengan pendekatan geospasial untuk menghasilkan model visualisasi 3D dan analisis spasial kawasan Hutan Konservasi Ubadari di Fakfak. Metodologi mencakup tahap akuisisi data citra menggunakan UAV (drone), pengolahan data dengan perangkat lunak berbasis komputer, serta analisis lanjutan menggunakan ArcGIS Pro untuk menghasilkan informasi spasial terkait topografi, vegetasi, dan zona risiko degradasi.

2.2 Peralatan dan Perangkat Lunak

Data primer diperoleh melalui misi pemetaan udara menggunakan UAV DJI Phantom 4 RTK dengan

spesifikasi sebagai berikut: Sensor kamera: CMOS 1 inch, 20 MP; Presisi RTK: Horizontal ± 1 cm; Vertikal ± 1.5 cm; Resolusi spasial: 5 cm/piksel (GSD); Overlap: Frontlap 80%, Sidelap 70%; Ketinggian terbang: ± 120 meter AGL; Format citra: JPEF + EXIF geotagging.

Data yang diperoleh diolah menggunakan ArcGIS Pro untuk pembuatan model 3D, visualisasi kontur wilayah, dan pengolahan citra multispektral. Untuk mendukung klasifikasi vegetasi dan segmentasi tutupan lahan, digunakan algoritma k-means clustering yang diimplementasikan melalui Python Script yang terintegrasi di dalam ArcGIS [10], [11].

Teknologi LiDAR direncanakan akan digunakan dalam penelitian lanjutan untuk memperkuat akurasi model topografi dan estimasi volume biomassa vegetasi.

2.3 Tahapan Penelitian

Gambar 2 adalah tahapan penelitian ini, dengan penjelasan detail berikut:

Perencanaan Penerbangan: Jalur penerbangan dirancang menggunakan perangkat lunak Dronelink dengan pengaturan ketinggian terbang 100meter dan overlap 70%, untuk memastikan area liputan data maksimal dan hasil citra yang optimal. Area prioritas dipetakan melalui diskusi dan koordinasi dengan YKI guna menentukan wilayah yang memiliki nilai konservasi strategis.

Pengumpulan Data: Akuisisi data dilakukan dengan UAV secara otomatis, mengikuti jalur penerbangan yang telah ditetapkan. Data yang dikumpulkan meliputi citra RGB dan multispektral, serta informasi topografi permukaan vegetasi. Pengambilan data dilakukan melalui lima sortie penerbangan untuk memastikan seluruh area studi terliput dengan baik [13].

Pengolahan Data Fotogrametri: Citra udara yang diperoleh diproses menggunakan algoritma Structure from Motion (SfM) untuk membangun point cloud dan menghasilkan model digital elevasi kawasan hutan. Selanjutnya, pembuatan Digital Surface Model (DSM) dan ortomosaik dilakukan menggunakan ArcGIS Pro. Visualisasi 3D kemudian dikembangkan untuk memetakan kontur topografi dan struktur vegetasi kawasan secara detail. Pengolahan data multispektral dilakukan dengan menghitung Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) guna menganalisis kondisi kesehatan vegetasi [9]. Sementara itu, klasifikasi area vegetasi dilakukan menggunakan algoritma k-means clustering untuk memisahkan zona berdasarkan tingkat kerapatan dan jenis tutupan lahan [10], [11].

Nilai akurasi hasil model dievaluasi menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) dengan Rumus 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2} \quad (1)$$

RMSE diperoleh sebesar 0,35 meter, menunjukkan akurasi tinggi dalam pemodelan elevasi untuk aplikasi konservasi [14].

Validasi Data: Validasi model dilakukan melalui *ground truthing* di sepuluh titik lokasi sampling lapangan untuk memastikan keakuratan hasil pemetaan. Selain itu, data sekunder dari peta topografi yang tersedia sebelumnya digunakan sebagai pembandingan untuk memverifikasi model spasial yang dihasilkan.



Gambar 2. Alur Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Visualisasi Topografi Kawasan

Hasil pemetaan dengan teknologi UAV menunjukkan variasi topografi yang signifikan di Kawasan Hutan Konservasi Ubadari. Berdasarkan model Digital Surface Model (DSM) yang dihasilkan, elevasi kawasan berkisar antara 50 hingga 450 meter di atas permukaan laut. Area dengan kemiringan lereng lebih dari 30% teridentifikasi sebagai zona rawan longsor dan erosi, yang berpotensi mempengaruhi stabilitas ekosistem serta meningkatkan risiko bencana alam.

Visualisasi model 3D yang dihasilkan melalui pengolahan citra UAV mempermudah proses identifikasi kontur wilayah dan jalur aliran air permukaan dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4. Penggunaan algoritma SfM terbukti efektif dalam membangun model topografi yang akurat dan detail, mendukung temuan Yu et al. [15] dan Pan [16], [17] terkait penerapan UAV dalam pemantauan kawasan konservasi.



Gambar 3 Visualisasi Model 3D Kawasan Hutan Konservasi Ubadari (Tampak Atas)

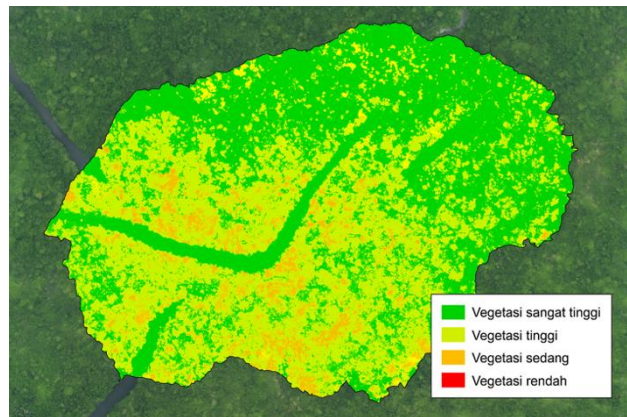


Gambar 4. Visualisasi Model 3D Kawasan Hutan Konservasi Ubadari (Tampak Perspektif)

3.2. Analisis Kesehatan Vegetasi

Analisis kesehatan vegetasi dilakukan menggunakan indeks NDVI berdasarkan citra multispectral hasil akuisisi UAV. Hasil klasifikasi NDVI, kawasan hutan dibagi menjadi empat kategori tingkat Kesehatan vegetasi, dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan analisis spasial, sekitar 28,5% dari total area (± 1505 ha dari total 5280 ha) termasuk dalam kategori vegetasi sangat tinggi ($NDVI > 0,75$). Sebesar 32,4% (± 1807 ha) termasuk kategori vegetasi tinggi ($NDVI 0,6-0,75$), sementara 24,1% (± 1272 ha) berada dalam kategori vegetasi sedang ($NDVI 0,4-0,6$). Sisanya 13,2% (± 696 ha) berada dalam kategori vegetasi rendah atau terdegradasi ($NDVI < 0,4$).

Klasifikasi ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kondisi tutupan vegetasi di kawasan konservasi. Zona dengan nilai NDVI rendah menjadi indikator awal terhadap kemungkinan adanya tekanan ekologis atau degradasi lingkungan. Informasi ini menjadi landasan penting dalam penentuan prioritas konservasi dan strategi mitigasi lingkungan. Temuan ini sejalan dengan pendekatan yang dikemukakan oleh Gallardo-Salazar et al. [18] dan Huang et al. [8] terkait efektivitas pemanfaatan NDVI berbasis UAV untuk pemantauan vegetasi secara cepat dan akurat.

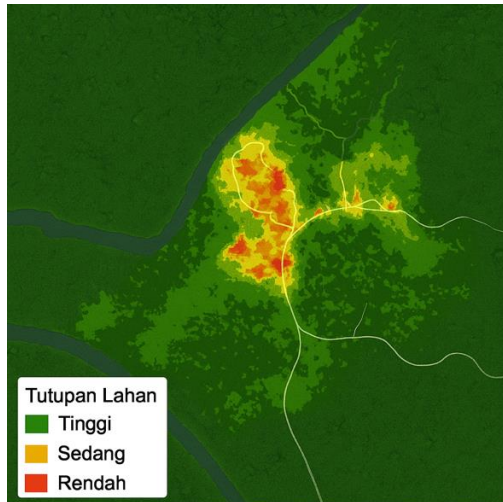


Gambar 5. Peta Klasifikasi Vegetasi Berdasarkan NDVI

3.3. Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan algoritma *k-means clustering* yang diimplementasikan melalui Python di lingkungan ArcGIS. Hasil klasifikasi membagi kawasan menjadi tiga jenis tutupan lahan yaitu vegetasi rapat mencakup 39,8% area (± 2101 ha), vegetasi sedang sebesar 36,5% (1928 ha), dan vegetasi rendah sebesar 23,7% (± 1250 ha) dapat dilihat pada Gambar 6. Komposisi ini menunjukkan bahwa Sebagian besar Kawasan masih didominasi vegetasi alami yang padat, meskipun terdapat area signifikan dengan tutupan rendah yang memerlukan perhatian lebih lanjut dalam pengelolaan konservasi.

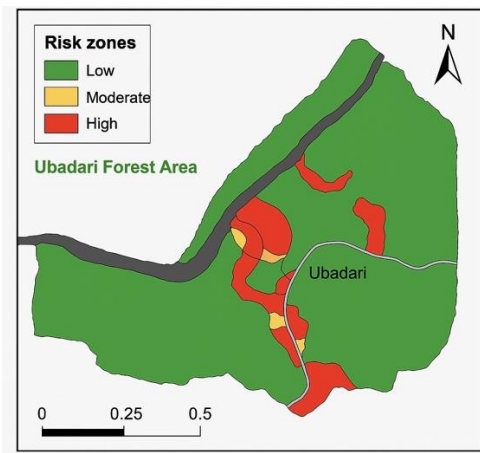
Klasifikasi ini membantu dalam memetakan distribusi vegetasi secara spasial dan menjadi dasar dalam penentuan strategi pengelolaan kawasan konservasi. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian Kusak et al. [18] dan Vediappan et al. [10], yang menekankan efektivitas *k-means* dalam pengelompokan tutupan lahan berbasis data spasial.



Gambar 6. Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Berdasarkan Algoritma *k-means Clustering*

3.4. Identifikasi Ancaman Lingkungan

Berdasarkan hasil *overlay* analisis topografi dan data NDVI, ditemukan bahwa area dengan nilai NDVI rendah cenderung berlokasi di dekat jalur akses manusia dan kawasan terbuka. Hal ini menunjukkan adanya potensi degradasi lahan akibat aktivitas manusia dan risiko tinggi terhadap kebakaran hutan. Identifikasi zona rawan degradasi dan potensi kebakaran menunjukkan bahwa sekitar 78% area (± 4118 ha) berada dalam zona risiko rendah, yang mencakup sebagian besar wilayah inti hutan. Sekitar 14% (± 739 ha) termasuk dalam zona risiko tinggi, yang umumnya tersebar di dekat jalur akses dan batas Kawasan, dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Peta Zona Rawan Degradasi dan Potensi Kebakaran Hutan

Sementara itu, 8% (± 422 ha) dikategorikan sebagai zona risiko sedang (*moderate*), tersebar secara sporadik di antara zona rendah dan tinggi.

Penerapan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) di masa depan menjadi strategi penting untuk mendeteksi potensi kebakaran secara dini untuk pengelolaan konservasi yang lebih responsif. Teknologi ini telah terbukti efektif dalam pengawasan kawasan rawan bencana sebagaimana diuraikan oleh Sharma et al. [9] dan Hasan et al. [5].

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membangun model visualisasi 3D Kawasan Hutan Konservasi Ubadari menggunakan teknologi UAV dan perangkat lunak ArcGIS Pro, dengan tingkat akurasi pemodelan yang tinggi (RMSE sebesar 0,35 meter). Hasil visualisasi topografi menunjukkan bahwa lebih dari 15% area studi memiliki kemiringan ekstrem ($>30\%$), yang berimplikasi terhadap kerentanan erosi dan risiko bencana alam.

Analisis kesehatan vegetasi berbasis NDVI mengidentifikasi bahwa sekitar 13,2% area (± 696 ha) tergolong vegetasi kurang sehat atau terdegradasi, sedangkan klasifikasi tutupan lahan menunjukkan 23,7% wilayah (± 1250 ha) berada pada kategori vegetasi rendah. Sementara itu, identifikasi zona rawan degradasi dan kebakaran memperlihatkan bahwa sekitar 14% area (± 739 ha) termasuk dalam kategori risiko tinggi, 8% (± 422 ha) risiko sedang, dan mayoritas 78% area (± 4118 ha) berada dalam zona risiko rendah. Temuan ini memberikan kontribusi kuantitatif yang signifikan dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data untuk pengelolaan konservasi yang lebih adaptif serta perencanaan mitigasi risiko lingkungan yang lebih tepat sasaran.

Sebagai penelitian tahap awal, fokus utama masih pada pengembangan visualisasi model 3D dan analisis spasial berbasis citra UAV. Penelitian lanjutan diharapkan dapat mengembangkan peta klasifikasi vegetasi yang lebih komprehensif berbasis analisis NDVI dan data multispectral. Selain itu, diharapkan dapat diterapkan algoritma Convolutional Neural Networks untuk meningkatkan akurasi dalam klasifikasi spesies pohon, serta mengintegrasikan teknologi LiDAR guna menghasilkan pemetaan topografi yang lebih presisi dan mendukung estimasi volume biomassa hutan. Penelitian mendatang juga direncanakan untuk menerapkan sistem monitoring berbasis IoT dalam mendukung deteksi dini kebakaran hutan dan mitigasi risiko bencana ekologi, serta memanfaatkan model prediktif berbasis machine learning untuk memproyeksikan perubahan tutupan lahan di masa depan.

Dengan adopsi teknologi UAV, penginderaan jauh, dan sistem analisis berbasis kecerdasan buatan, pengelolaan

kawasan hutan konservasi di Indonesia diharapkan menjadi lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Fakfak atas dukungan pendanaan, serta Yayasan Konservasi Indonesia atas dukungan data dan bantuan teknis yang telah diberikan selama proses penelitian ini berlangsung.

Daftar Rujukan

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), *Strategi dan Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati Indonesia 2015-2-2*. Jakarta: KLHK, 2016.
- [2] K. Krey and P. Tawurutubun, "Herpetofauna dari Hutan Desa Ubadari, Fakfak: Keanekaragaman, Kepadatan, dan Upaya Konservasi," *Igya Ser Hanjop: Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, vol. 3, no. 2, pp. 159-176, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.47039/ish.3.2021.159-176>
- [3] H. Lin, "Three-dimensional forest mapping using photogrammetry and LiDAR: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 169, pp. 1-20, 2020.
- [4] S. N. Jonkman et al., "Flood risk assessment with UAV imagery and GIS-based tools" *Natural Hazards*, vil. 103, no. 2, pp. 1493-1512, 2020.
- [5] M. K. Hasan, M. S. Hossain, and S. Rahman, "Application of AI and IoT in early forest fire detection systems: A review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 47285-47299, 2022.
- [6] P. R. Jha and V. K. Jha, "UAV-based LiDAR and multispectral data fusion for forest biomass estimation," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, no. 2, pp. 1-15, 2022.
- [7] M. Tmušić et al., "A review of the applications of remaote sensing in protected area management," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 6, pp. 1-23, 2020.
- [8] M. Huang et al., "Combining NDVI time series and machine learning algorithms to predict forest biomass," *Ecological Indicators*, vol. 134, p. 108427, 2022.
- [9] A. Sharma et al., "An IoT-based forest fire detection system: design and testing," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, pp. 38685-38710, 2024.
- [10] D. M. Vediappan, A. Godi, and B. Golla, "Geospatial Mapping of Soil Properties of Forest Types Using the k-Means Fuzzy Clustering Approach to Delineate Site-Specific Nutrient Management Zones in Goa, India," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 53, pp. 1-16, 2025.
- [11] L. Ma et al., "Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 180, pp. 364-384, 2021.
- [12] A. Torresan et al., "Forestry applications of UAVs in Europe: A review," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 8-10, pp. 2427-2447, 2017.
- [13] P. Ghamisi et al., "Advances in remote sensing image classification," *IEEE Geoscience and remote Sensing Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 43-64, 2019.
- [14] A. A. Mulabagal and H. Y. Lee, "NDVI analysis using drone imagery for vegetation health monitoring," *Journal of Environmental Informatics*, vol. 39, no. 3, pp. 45-56, 2022.
- [15] B. Yu, Z. Wang, and Y. Chen, "Recent advances in UAV-based forest monitoring: A comprehensive review," *Remote Sensing of Environment*, vol. 253, p. 112233, 2021.
- [16] Y. Pan, "Estimating individual tree variables using UAV LiDAR," *Forest Engineering*, 2024. [Online].
- [17] J. L. Gallardo-Salazar et al., "Multi-temporal NDVI analysis using UAV images of tree crowns in a northern Mexican pine-oak forest," *Journal of Forestry Research*, vol. 34, pp. 1855-1867, 2023.
- [18] L. Kusak et al., "Apriori association rule and K-means clustering algorithms for interpretation of pre-event landslide areas," *Open Geosciences*, vol. 12, no. 1, pp. 1231-1240, 2020.